



## بررسی حالت آشفته پدیده فرورزناس با در نظر گرفتن اثر بایاس DC

بهزاد نوروزی<sup>۱</sup>، بهروز رضایی علم<sup>۲</sup> و محمد نظری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه لرستان، Behzad\_noroozi@yahoo.com

<sup>۲</sup>دانشگاه لرستان، Rezaee.bh@lu.ac.ir

<sup>۳</sup>دانشگاه لرستان، nazari.mo66@gmail.com

چکیده - فرورزناس یک پدیده غیرخطی و بااهمیت در مسائل کیفیت توان است. این پدیده بین خازن شبکه و اندوکتانس غیرخطی تجهیزات نظیر راکتور یا سیم پیچ ترانسفورماتور در حالت اشباع رخ می دهد. فرورزناس بیشتر در ترانسفورماتورهای بی باری یا بار اندک دیده می شود. در این مقاله پدیده فرورزناس بر روی یک ترانس تک فاز بررسی شده است. با استفاده از روش اجزا محدود به کمک نرم افزار *Cmsol Multiphysics* ترانسفورماتور در فضای دوبعدی شبیه سازی شده است. در بررسی این پدیده منحنی اشباع با مقدار بایاس DC در نظر گرفته شده است. اثر مقدار بایاس DC در توزیع چگالی شار و منحنی هیستریزس هسته مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین شبیه سازی های انجام شده نشان می دهد، هنگام وقوع فرورزناس شکل موج ولتاژ و جریان ترانسفورماتور از حالت سینوسی خارج شده و دامنه ولتاژ و جریان تا حدود زیادی افزایش می یابد که در فرکانس اصلی و فرکانس های بالاتر باعث مشکلات عایقی و در فرکانس های کمتر باعث مشکلات حرارتی می شود.

کلیدواژه- بایاس DC، ترانس تک فاز، فرورزناس، *FEM*، *Cmsol Multiphysics*

باعث سوختن تجهیزات آن می شود. همچنین به علت تغییر شکل موج جریان و ولتاژ و وجود هارمونیک ها و زیر هارمونیک ها، در بعضی موارد عملکرد نادرست رله های حفاظتی را نیز در پی دارد [۶].

در سیستم های قدرت مقدار بایاس DC ممکن است از طریق زمین یا وجود ادوات مختلف به سیم پیچ ترانسفورماتور تزریق شود. این موضوع باعث به اشباع رفتن هسته ترانسفورماتور می گردد. این پدیده منجر به تأثیرات ناخواسته بر روی ترانسفورماتور می شود. عدم تقارن در شکل موج جریان و ولتاژ، افزایش تلفات و ایجاد نقاط داغ در هسته از عوارض جانبی این پدیده است [۷]. در بررسی پدیده فرورزناس در نظر گرفتن این شرایط حائز اهمیت است.

در حالت کلی شبیه سازی فرورزناس در ترانسفورماتورها با ساختارهای مختلف هسته و سیم پیچ، نیازمند تمهیدات بسیار و مدل سازی دقیق کلیه پدیده های غیرخطی ترانسفورماتور است. در این مقاله پدیده فرورزناس بر روی یک ترانسفورماتور تک فاز بررسی شده است. از روش اجزاء محدود (*FEM*) جهت شبیه سازی در نرم افزار کامسول (*Cmsol Multiphysics*) استفاده شده است.

### ۱- مقدمه

مسئله فرورزناس یکی از مسائل مرتبط با ترانسفورماتورها است که از اهمیت فراوانی برخوردار است. سال های متمادی است که این پدیده در سطوح مختلف ولتاژی شبکه های کشورهای مختلف رخ می دهد [۳]-[۱]. با توجه به اهمیت موضوع پژوهش های مختلفی در این زمینه صورت گرفته است. این پدیده عموماً در اثر متقابل بین اندوکتانس غیرخطی ترانسفورماتور و خازن شبکه رخ می دهد [۴]. در شرایط بی باری یا بار اندک، با بروز اغتشاشات سیم پیچ ترانسفورماتور از طریق ظرفیت خازنی خطوط و سیم پیچ های ترانسفورماتور مدار رزونانس تشکیل می دهد و با اشباع شدن هسته ترانسفورماتور، فرورزناس رخ می دهد. اگرچه رزونانس نیز شامل یک خازن و یک اندوکتانس است. اما به طور قطع فرکانس رزونانسی که در آن فرورزناس اتفاق می افتد، وجود ندارد. به گونه ای که در پدیده فرورزناس بیش از یک پاسخ برای مجموعه ای از پارامترهای یکسان وجود دارد [۵]. در هنگام بروز فرورزناس دامنه ولتاژ و جریان و یا هر دو به اندازه ای زیاد است که می تواند خسارات جبران ناپذیری به شبکه وارد کرده و



راکتانس مغناطیسی شوندگی کاهش یافته و فرورزناس رخ می‌دهد. بنابراین فرورزناس یک پدیده غیرخطی بوده که تابع پارامترهایی شامل ولتاژ القاشده، مشخصه مغناطیسی شوندگی، تلفات و خازن مدار است.

### ۳- روش اجزا محدود

در ریاضیات روش المان محدود یک روش عددی برای حل تقریبی مسائل مرزی است. این روش مشابه ایده اتصال بسیاری از خطوط کوچک مستقیم است که می‌تواند یک دایره بزرگ‌تر را تقریب بزند. FEM شامل تمام روش‌ها برای اتصال بسیاری از معادلات عناصر ساده در طول بسیاری از زیر دامنه‌های کوچک (که عناصر محدود نامیده می‌شوند) است. و یک معادله پیچیده‌تر را با یک دامنه بزرگ‌تر تقریب می‌زند [۹]. به‌طور کل FEM شامل سه ماتریس اصلی، که عبارت‌اند از: ماتریس مالکیت، ماتریس رفتار و ماتریس عمل.

$$\{K\} \cdot \{U\} = \{F\} \quad (1)$$

در کاربردهای الکتریکی،  $\{K\}$  می‌تواند نشان‌دهنده ثابت گذردهی الکتریک،  $\{U\}$  نشان‌دهنده پتانسیل و  $\{F\}$  بار الکتریکی است.

از روش اجزا محدود به کمک نرم‌افزار کامسول جهت شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده شده است [۱۰]. این نرم‌افزار معادلات سیستم‌های غیرخطی را توسط مشتقات جزئی با حضور میدان الکترومغناطیسی و ... حل می‌نماید. همچنین در آن امکان تعریف مدارات الکتریکی نظیر بار، مقاومت، سلف، خازن و ... به همراه میدان مغناطیسی وجود دارد.

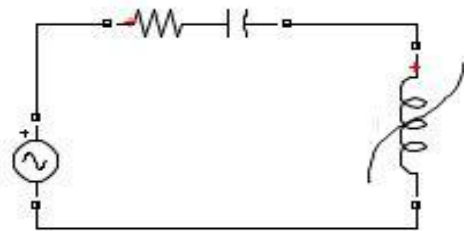
### ۴- تعیین پارامترها

برای بررسی پدیده فرورزناس از یک سری تجهیزات متشکل از یک ترانسفورماتور تک فاز استفاده شده است. ترانسفورماتور در این حالت بدون بار در نظر گرفته شده است. خازن به‌صورت سری با سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور قرار گرفته است. با ولتاژ ۲۲۰ ولت و فرکانس ۶۰ هرتز در مدار قرار گرفته است. مشخصات ترانسفورماتور در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین ابعاد هندسی ترانسفورماتور در شکل (۲) نشان داده شده است.

در بخش ۲ به مبانی پدیده فرورزناس جهت تفهیم هرچه بهتر این پدیده پرداخته شده است. در بخش ۳ توضیح مختصری پیرامون روش المان محدود به کمک نرم‌افزار مربوطه ارائه شده است. در بخش ۴ پارامترهای لازم جهت شبیه‌سازی آورده شده است. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

### ۲- مبانی پدیده فرورزناس

هنگامی که هسته‌های فرو مغناطیسی تجهیزات فشارقوی اشباع و در مدار به‌صورت سری با خاصیت خازنی قرار می‌گیرند، شرایط برای پدیده فرورزناس فراهم می‌شود. در سیستم‌های قدرت، ترانسفورماتورها به‌طور عمده توسط کابل‌ها تغذیه می‌شوند. کابل‌ها خاصیت خازنی بالا برخوردارند و به‌طور سری با سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای مجهز به هسته فرو مغناطیسی قرار گرفته‌اند [۸]. فرورزناس از نوع اضافه ولتاژهای موقت است و انواع مختلفی دارد. این پدیده از جنبه‌های دامنه و مدت‌زمان و هارمونیک‌های موجود در آن قابل‌بحث و بررسی است. اگر موجی با دامنه زیاد و هارمونیک‌های بیشتر در مدت‌زمان طولانی بر روی تجهیزات وجود داشته باشد، موجب خسارت و حتی تخریب آن می‌شود. به‌عنوان مثال وجود ولتاژ هارمونیکی بر روی ترانسفورماتور سبب گرم شدن و صدمه دیدن سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور می‌شود. بنابراین باید از وجود این عامل که تحت پدیده فرورزناس بر روی ترانسفورماتور است، جلوگیری نمود.



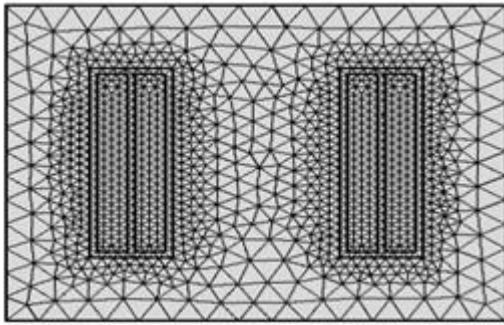
شکل (۱): مدار معادل فرورزناس

شکل (۱) مدار معادل پدیده فرورزناس را نشان می‌دهد که در آن سلف دارای مشخصه غیرخطی است. با عبور جریان از مدار، خازن شارژ می‌شود. ولتاژ ذخیره‌شده در خازن را می‌توان DC فرض نمود که در دوسر راکتانس مغناطیسی شوندگی ترانسفورماتور قرار گرفته و باعث می‌شود تا هسته به اشباع برود.



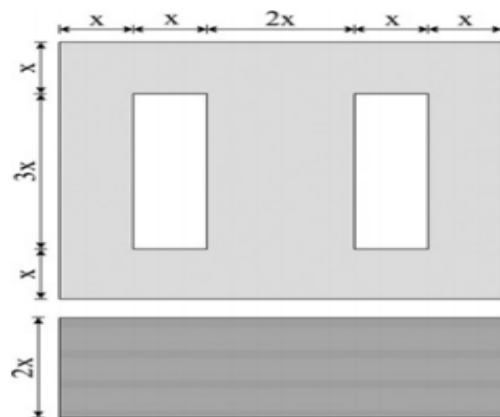
جدول ۱: مشخصات ترانسفورماتور مورد مطالعه

پارامتر	مقدار
توان نامی	۲۰ W
ولتاژ	۲۲۰/۱۲ V
فرکانس	۵۰ Hz
تعداد دور اولیه	۱۶۰۰
تعداد دور ثانویه	۹۰

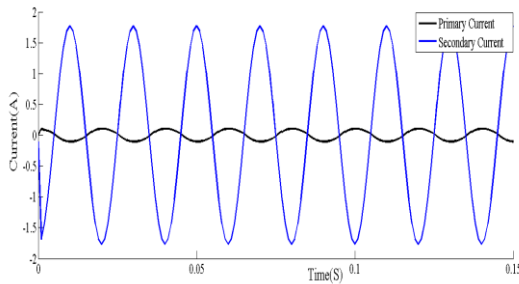


شکل (۴): نحوه مش بندی ترانسفورماتور

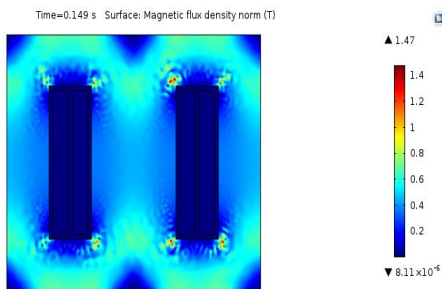
شکل (۳) منحنی B-H را برای این ماده نشان می‌دهد. این بدان معنی است که توزیع غیریکنواخت در ماده در نظر گرفته شده است. شکل (۴) نحوه مش بندی ترانسفورماتور را به صورت مش بندی سه گره‌ای نشان می‌دهد. شکل (۵) منحنی جریان اولیه و ثانویه ترانسفورماتور و شکل (۶) توزیع چگالی شار هسته را در حالت عملکرد عادی نشان می‌دهد.



شکل (۲): ابعاد هندسی ترانسفورماتور



شکل (۵): منحنی جریان اولیه و ثانویه ترانسفورماتور

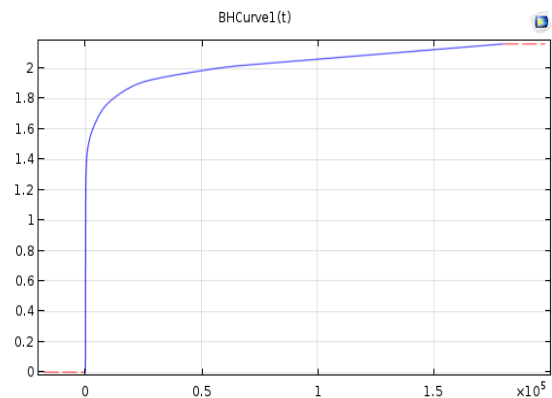


شکل (۶): توزیع چگالی شار در حالت عملکرد عادی

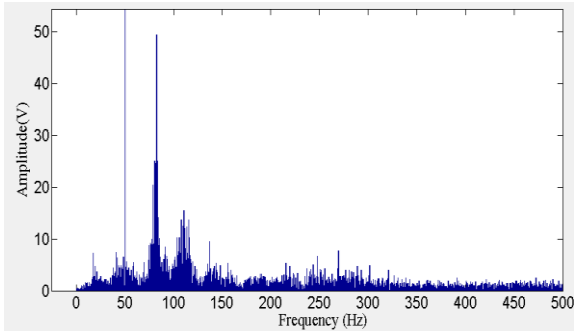
در صورتی که ظرفیت خازنی خطوط، سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور و یا بار متصل به ترانسفورماتور اثر سلفی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور را خنثی کنند، فرورزنانس اتفاق افتاده و باعث ایجاد جریان‌های نامتعادل و ولتاژهای بزرگ در

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی ترانسفورماتور در نرم‌افزار کامسول در فضای دوبعدی صورت گرفته است. با توجه به اینکه در این نرم‌افزار جنس هسته ترانسفورماتور را می‌توان مشخص نمود. لذا مطابق با استانداردهای خاص تولید ترانسفورماتور جنس هسته ترانسفورماتور از آلیاژ ۳۵PN۳۰۰ Silicon Steel NGO استفاده شده است. نفوذپذیری نسبی این ماده را می‌توان با یک منحنی B-H نشان داد که برای هر جهت متفاوت است.



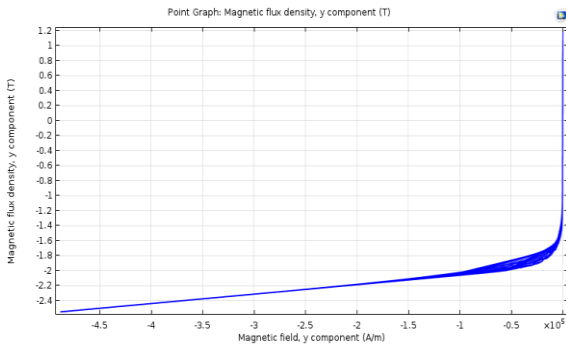
شکل (۳): منحنی B-H برای آلیاژ استیل



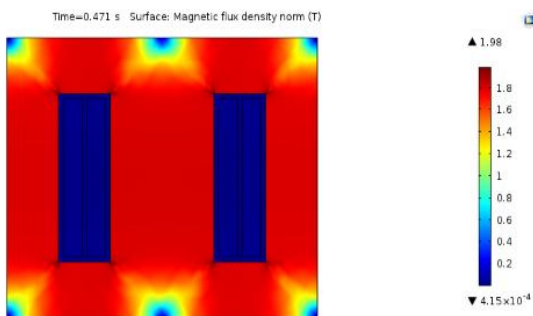
شکل (۱۰): طیف فرکانسی ولتاژ خازن مدار

طیف فرکانسی ولتاژ متغیر مدار در شکل (۱۰) نشان داده شده است. طیف فرکانسی به صورت پیوسته بوده و وجود هارمونیک‌های مختلف در مدار را نشان می‌دهد. در این حالت منحنی جریان و ولتاژ از حالت سینوسی خارج می‌شوند. دامنه ولتاژ و جریان به میزان زیادی افزایش یافته است. وجود هارمونیک‌های ولتاژ و جریان باعث گرم‌تر شدن و صدمات عایقی ترانسفورماتور می‌گردد.

با اعمال اثر بایاس DC هسته ترانسفورماتور در اشباع بیشتری قرار می‌گیرد. این امر در منحنی B-H هسته ترانسفورماتور مطابق شکل (۱۱) مشخص شده است. شکل (۱۲) توزیع چگالی شار را در این حالت نشان می‌دهد.

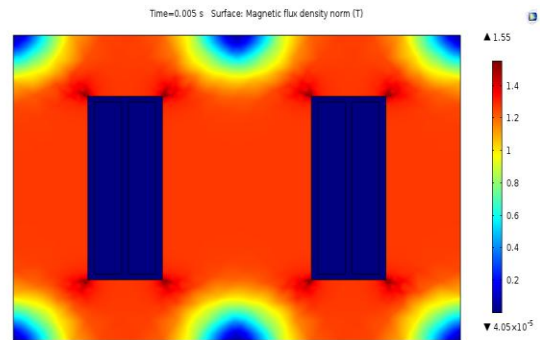


شکل (۱۱): منحنی B-H هسته ترانسفورماتور

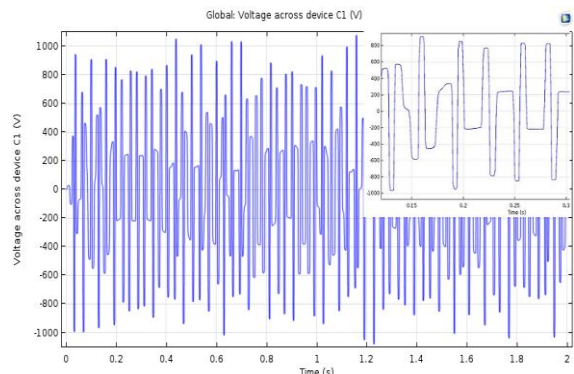


شکل (۱۲): توزیع چگالی شار حین وقوع فرورزناس با اثر بایاس DC

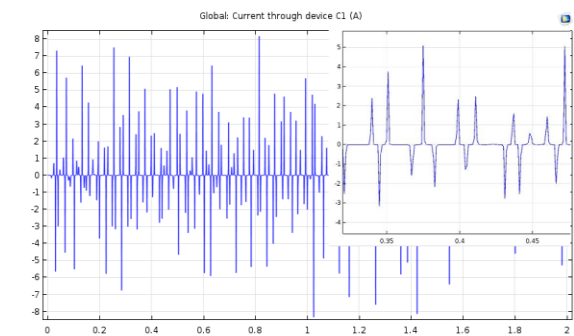
ترانسفورماتور می‌شود. شکل (۷) توزیع چگالی شار را حین وقوع فرورزناس بدون در نظر گرفتن اثر بایاس DC را نشان می‌دهد. هنگام وقوع فرورزناس هسته ترانسفورماتور وارد اشباع مغناطیسی می‌شود. این موضوع در (۷) نشان داده شده است. شکل (۸) و (۹) به ترتیب منحنی جریان اولیه ترانسفورماتور و ولتاژ خازن را حین وقوع فرورزناس در حالت قبل نشان می‌دهد. فرورزناس در ظرفیت خازنی به مقدار ۳ میکرو فاراد رخ داده است.



شکل (۷): توزیع چگالی شار حین وقوع فرورزناس بدون اثر بایاس DC



شکل (۸): شکل موج ولتاژ حین وقوع فرورزناس بدون اثر بایاس DC



شکل (۹): شکل موج جریان حین وقوع فرورزناس بدون اثر بایاس DC

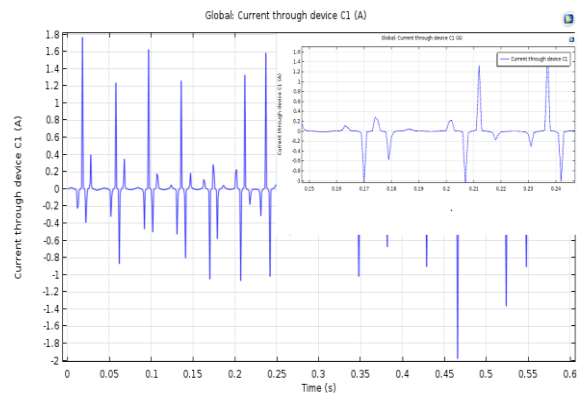


سینوسی خارج شده و دامنه ولتاژ و جریان تا حد زیادی افزایش می‌یابد. این افزایش دامنه در ترانسفورماتورهای قدرت موجب شکست عایقی و گرم‌تر شدن ترانسفورماتور می‌شود. همچنین وجود هارمونیک‌های مختلف، حالت آشفته فرورزناس را نشان داده شده است. در واقعیت وجود بایاس DC در ورودی ترانسفورماتورها اثرات مخربی را ایجاد می‌کند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد، بایاس DC هسته ترانسفورماتور را در اشباع بیش‌ازحد قرار می‌دهد که این اثر باعث ایجاد نقاط داغ در هسته ترانسفورماتور گردیده و عمر مفید آن را کاهش می‌دهد. همچنین باعث تغییر وقوع فرورزناس آشفته در ظرفیت خازنی دیگری می‌شود.

## مراجع

- [۱] Iravani M. R., Chaudhary A. K. S., Giesbrecht W. J., et. Al. "Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients—Part III: The Study of Ferroresonance", *Slow Transients Task Force of the IEEE Working Group on Modeling and Analysis of Systems Transients Using Digital Programs, IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. ۱۵, No. ۱, Jan. ۲۰۰۰.
- [۲] Jacobson D., "Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System", *IEEE PES annual meeting, Toronto, Canada, July ۲۰۰۳*.
- [۳] Dugan, R.C.; "Examples of Ferroresonance in Distribution Systems", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. ۲, ۱۳-۱۷ July ۲۰۰۳.
- [۴] Miroslav poljak, Tomislav Kelemen, Boris Bojanic, "New experience with ferroresonance", *Technical Bulletin of Koncar*.
- [۵] B. A. Mork and D. L. Stuehm, "Application of nonlinear dynamics a Chaos to Ferroresonance in Distribution Systems," *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. ۹, No. ۲, ۱۹۹۱, pp. ۱۰۰۹-۱۰۱۱.
- [۶] A. Rezaei-Zare, M. Sanaye-Pasand, H. Mohseni, S. Farhangi, and R. Iravani, "Analysis of ferroresonance modes in power transformers using Preisach-type hysteretic magnetizing inductance," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. ۲۲, no. ۲, pp. ۹۱۹-۹۲۹, Apr. ۲۰۰۷.
- [۷] S.A. Mousavi, "Electromagnetic Modelling of Power Transformers with DC Magnetization" *Licentiate Thesis, SE-۱۰۰ ۴۴ Stockholm, Sweden ۲۰۱۲*.
- [۸] Valverde, G. Buigues, A. J. Mazón, I. Zamora, I. Albizu, "Ferroresonant configurations in power systems", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPO'۱۲*
- [۹] Wikipedia[online].[http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method), July ۱۰, ۲۰۱۳.
- [۱۰] COMSOL, MULTIPHYSICS©(FEMLAB), [online].<http://www.comsol.com>

شکل (۱۳) و (۱۴) به ترتیب منحنی جریان و ولتاژ را در این حالت نشان می‌دهند. در این حالت دامنه ولتاژ و جریان در زمان‌های متفاوت تغییر کرده است. با توجه به این موضوع که هسته در اشباع بیشتری قرار دارد، فرورزناس در ظرفیت خازنی دیگری به مقدار ۷۰ میکرو فاراد رخ داده است. بنابراین بایاس DC نه تنها بر اشباع هسته ترانسفورماتور تأثیر می‌گذارد و با ایجاد نقاط داغ در هسته باعث کاهش کارایی ترانسفورماتور می‌گردد بلکه باعث تغییر فرکانس خازنی حین وقوع فرورزناس نیز می‌شود.



شکل (۱۳): منحنی جریان حین وقوع فرورزناس با اثر بایاس DC



شکل (۱۴): منحنی ولتاژ حین وقوع فرورزناس با اثر بایاس DC

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از روش اجزا محدود، پدیده فرورزناس در ترانسفورماتورها مورد مطالعه قرار گرفته است. این پدیده بر روی یک ترانسفورماتور تک فاز بررسی شده است. در این پژوهش منحنی اشباع مطابق با نوع هسته آهنی به کار گرفته شده در ترانسفورماتورهای معمولی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، هنگام وقوع فرورزناس هسته مغناطیسی وارد اشباع مغناطیسی می‌شود. شکل موج جریان و ولتاژ از حالت



هفدهمین کنفرانس ملی دانشجویی مهندسی برق ایران  
دانشگاه پیام نور  
مرکز مشهد

هفدهمین کنفرانس ملی - دانشجویی مهندسی برق ایران  
دانشگاه پیام نور مرکز مشهد، ۲۶ الی ۲۸ آبان ۱۳۹۴



دانشگاه پیام نور  
مرکز مشهد